

УДК 550.34; 624.131.31

DOI: 10.23671/VNC.2016.2.20815

## СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ БЛИЖНИХ РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ И ВОЗМОЖНОСТИ СОВРЕМЕННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ – ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ КРУПНОПАНЕЛЬНОГО ЗДАНИЯ С СУПЕРШИРОКИМ ШАГОМ СТЕН

© 2016 П.А. Реквава, д.т.н., проф.

Грузинская национальная ассоциация сейсмостойкого строительства и инженерной сейсмологии, Грузия, Тбилиси, ул. М. Лебанидзе, д. 7, e-mail: rekavapaata@yahoo.com

В работе рассмотрена проблема сейсмического прогноза и его эффективности. Проведен анализ ситуации при реализации среднесрочного прогноза разрушительного Тбилисского землетрясения 25 апреля 2002 года в Грузии.

Рассмотрены инженерно-геологические, геоморфологические и гидрогеологические условия г. Тбилиси. Показаны изосейсты 5-тибального форшока и 7-мибального основного толчка.

В данной статье рассматриваются записи ряда разрушительных землетрясений, очаг которых находился вблизи урбанизированной территории. Проведен анализ инструментальных записей. Показано, что нахождение урбанизированной территории в ближней зоне источника обуславливает наличие высокочастотной вертикальной составляющей, предвещающей основные колебания. Хорошо известно, что поглощение сейсмических волн прямо пропорционально частоте колебаний, что предполагает быстрое затухание высокочастотной составляющей сигнала. При этом, за редким исключением, большинство записей производится станциями, достаточно удаленными от места событий. Традиционное использование инерционных сейсмоприемников при этом исключает регистрацию указанных высокочастотных сигналов.

Исходя из того обстоятельства, что землетрясения расположены непосредственно под территорией г. Тбилиси использование соответствующих записей должно позволить получать реакции зданий и сооружений на подобные воздействия максимально приближенными к реальным условиям. В этой связи исследована эффективность применения в жилых зданиях конструктивной схемы с супершироким шагом на примере 5-этажного крупнопанельного дома. Был произведен динамический расчет методом конечных элементов.

**Ключевые слова:** сейсмические воздействия, поглощение, сейсмическая энергия, сейсмическая волна, сейсмостойкость, суперширокий шаг стен, максимальное горизонтальное ускорение.

В апреле 2002 г. на территории г. Тбилиси весьма неожиданно произошли т.н. Тбилисские апрельские землетрясения. Как и при предыдущем Гоубанском землетрясении, которое произошло 14 декабря 2000 г., при землетрясениях ощущались сильные вертикальные толчки. Население Кавказского региона, характеризующегося умеренной сейсмической активностью и, в частности, г. Тбилиси, как правило, наиболее часто ощущает проявления относительно удаленных землетрясений, которые характеризуются преобладающим горизонтальным движением. В связи с этим, вертикальные удары характеризуются весьма сильным отрицательным психологическим воздействием [Заалишвили, 2009].

Первое землетрясение 11 апреля 2002 г. по имеющимся в начале исследования данным не сопровождалось повреждением или разрушениями. Тем не менее, про-

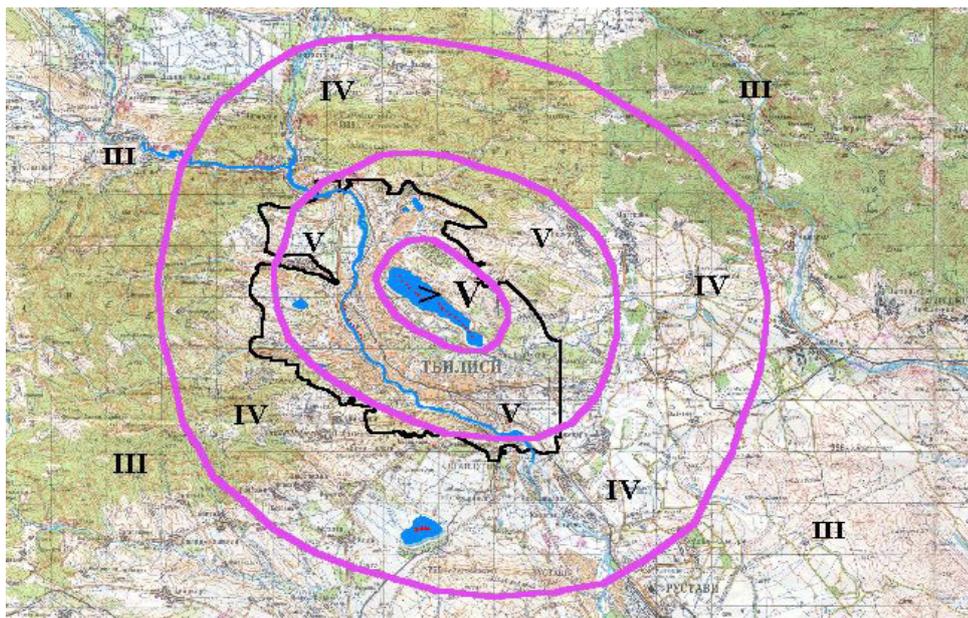


Рис. 1. Изосейсты Тбилисского землетрясения от 11 апреля 2002 г.

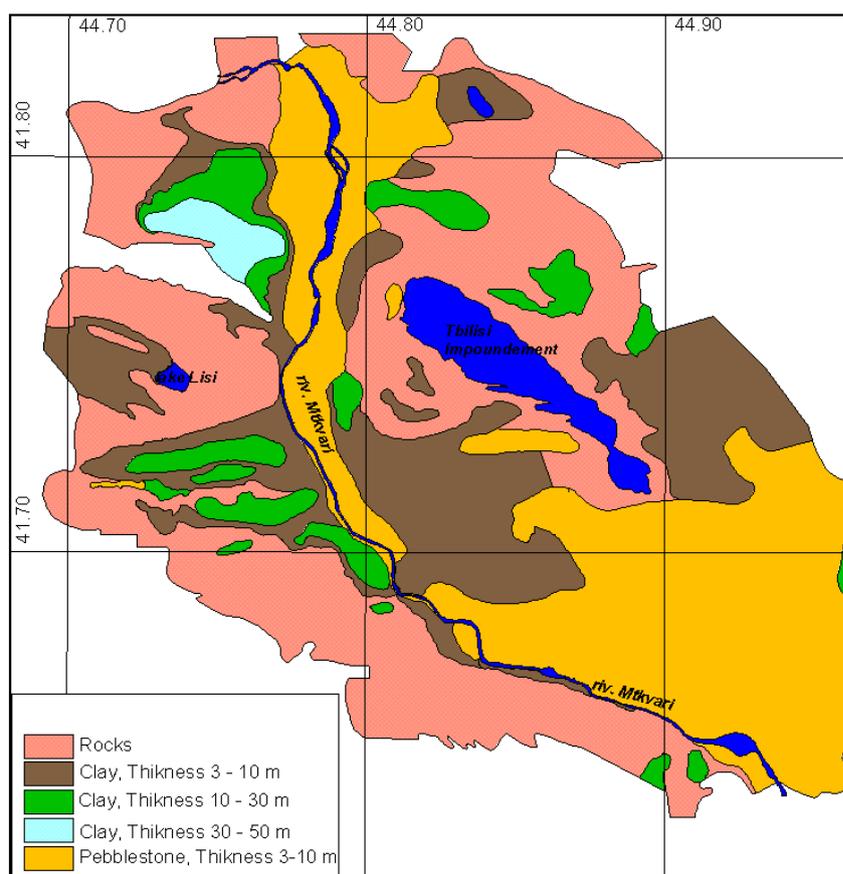


Рис. 2. Карта-схема инженерно-геологических условий г. Тбилиси

веденное под руководством В.Б. Заалишвили опросное макросейсмическое обследование последствий землетрясения, почти полностью основанное на описательных данных позволило установить, что эпицентр находится непосредственно на территории г. Тбилиси.

Выявление гипоцентра непосредственно под городом напомнило о т.н. «Тбилисских» землетрясениях позапрошлого века, когда в первой половине 19 столетия в Тбилиси произошел целый ряд заметных землетрясений [Гогмачадзе и др., 2007].

Эпицентральная зона характеризовалась массовым боем посуды, сдвигом тяжелой мебели, поломкой оконных стекол и т.п. Далее по результатам макросейсмического обследования были построены изосейсты землетрясения 11 апреля 2002 года (рис. 1). Анализ изосейст показывает, что эпицентральная зона землетрясения охватывает северо-западную часть города. После указанного землетрясения, совершенно закономерно, в городе были зарегистрированы афтершоки. При этом имело место совершенно непонятное возрастание активности. Дело доходило до того, что за день происходил ряд весьма ощутимых толчков. Все это дало основание руководителю лаборатории инженерной сейсмологии 13 апреля 2002 г. дать прогноз сильного землетрясения на территории Тбилиси в течение месяца [Гогмачадзе и др., 2007].

Известно, что на инженерное проявление землетрясений значительное влияние оказывают грунтовые условия территории, являющихся грунтами-основаниями существующей застройки. В связи с этим, прежде чем перейти к проявлению землетрясения на территории города, рассмотрим особенности грунтовых условий города.

Грунтовые условия, фактически, полностью исчерпывают характеристики такого влияния и включают в себя следующие факторы: инженерно-геологические, гидрогеологические и геоморфологические условия (рис. 2). Согласно имеющимся данным [Гогмачадзе и др., 2007] на территории г. Тбилиси в соответствии с картой – схемой распространены следующие грунты: скальные, глинистые, мощностью 3–10 м, глинистые, мощностью 10–30 м, глинистые мощностью 30–50 м и галечники мощностью 3–10 м. В геоморфологическом отношении город расположен в глубокой долине и занимает площадь 360 км<sup>2</sup>. Река Мтквари (Кура – *ред.*) проходит через весь город в южном направлении и делит его на две части: более высокий правый берег и низкий левый берег. Правый берег отличает переплетение горных хребтов и депрессий широтного направления. Морфология левого берега сильно отличается от правого. Рельеф там более пологий. Террасы – расположены на обеих сторонах долины реки Мтквари. В пределах города расположено шесть террас. Террасы более четко прослеживаются на больших площадях левого берега. На правой стороне реки террасы простираются подобно прерывистой полосе.

Река Мтквари протекает с севера на юго-восток Тбилиси. Берега реки ясно очерчены и укреплены стенами высотой 5–6 м. Глубина реки в пределах города колеблется в диапазоне 0,3–2,0 м. Скорость потока от 0,4 до 2,7 м/сек.

Самые важные правые притоки реки Мтквари – реки Вере и Дигомисцкали, меньшие – Табахмелисцкали и Дабахханисцкали. Выше отмеченные реки – типичные горные потоки. Это – реки с низким уровнем воды и они даже могут высыхать после нескольких засушливых лет. В то же время в течение дождливого сезона эти реки превращаются в бурные потоки. Левые притоки реки Мтквари – Глдани и Хевдзари – периодически активные потоки. Реки приносят значительное количество воды только в течение дождливых сезонов и периода таяния снега. Кроме вышеупомянутых рек есть несколько озер и водоемов в Тбилиси: искусственный водоем, т.н. Тбилисское Море, с площадью водной поверхности около 32 км<sup>2</sup> и максимальной глубиной 40 м, и двух небольших озер: Лиси и Черепашье с максимальной глубиной 2 м. Гидрогеологические условия в грунтах хорошо изучены и учитываются при расчетах сейсмической опасности.

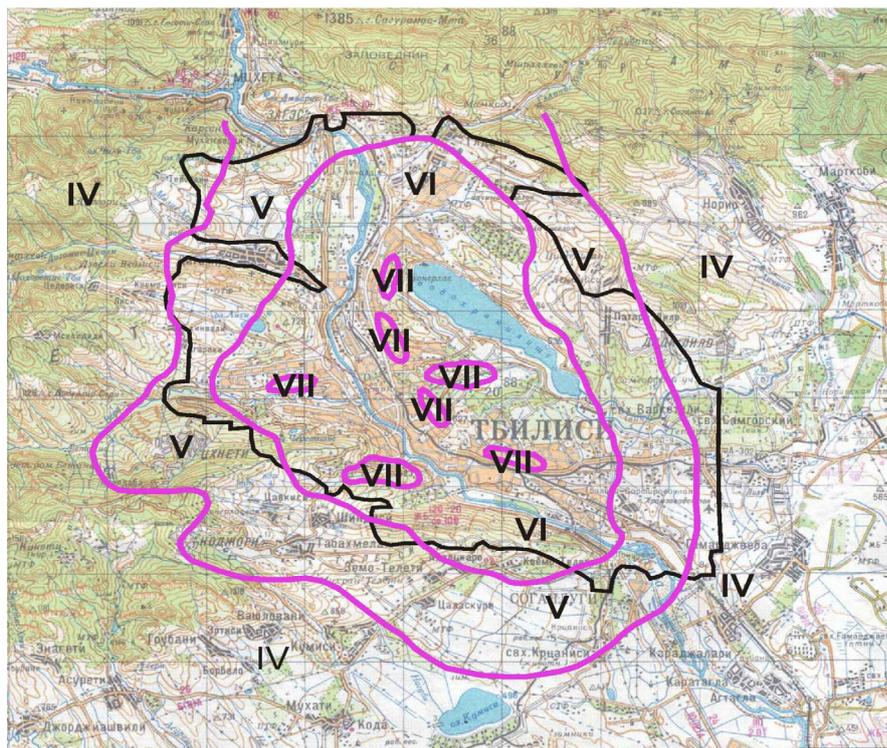


Рис. 3. Изосейсты Тбилисского землетрясения от 25 апреля 2002 г.

25 апреля на территории Тбилиси произошло разрушительное землетрясение с преобладающим вертикальным толчком с магнитудой порядка  $M=4,5$ . В результате землетрясения 25 апреля 2002 г. в Тбилиси погибло 9 человек. В городе землетрясение привело к значительным разрушениям и серьезным повреждениям. Сотни людей осталось без крова. Эпицентр землетрясения был расположен вновь, как и предполагалось, в восточной части города, естественно перекрыв эпицентральной зону землетрясения от 11 апреля 2002 г., фактически став форшоком данного землетрясения (рис. 3) [Гогмачадзе и др., 2007].

Активизация геодинамических процессов на Кавказе [Бондырев, Заалишвили, 2003] предполагает разработку действенных методов для снижения уязвимости территории. Прежде, чем продолжить хотелось бы остановиться на современном состоянии проблемы прогноза землетрясений. Хотя в мировом сообществе практически единодушно принята при современном уровне знаний и многофакторности процесса невозможность краткосрочного прогноза сильного землетрясения, тем не менее, соответствующие исследования продолжаются. Среднесрочные прогнозы, как мы видим, более реальны, но и они нуждаются в дальнейшем изучении.

Наиболее обосновано для инженера использование долгосрочного прогноза. В последние годы активно развивается геодезический мониторинг для прогноза землетрясений [Заалишвили и др., 2011] Основой такого прогноза служит всемерное изучение строения и состояния среды, обусловленного совокупностью различных физических полей [Заалишвили и др., 2012; Заалишвили и др., 2013а]. К таким прогнозным подходам относятся результаты сейсмического районирования и микрорайонирования [Заалишвили, 1986, 1996, 1997, 2008, 2014а; Заалишвили и др., 2013б; Zaalishvili, Rogozhin, 2011]. Современные методы хранения, обработки и анализа данных позволяют значительно развить наши представления о процессах, происходящих в среде и ее особенностях [Заалишвили и др., 2002; Заалишвили и др., 2013в; 2013г]. При этом грунты изучаются более целенаправленно, что позволяет учитывать целый ряд их важнейших характеристик, таких как влияние

строения толщи на спектральные особенности их колебаний и взаимосвязи между их линейными и нелинейными свойствами [Заалишвили и др., 2014б; 2013в]. Это позволяет, в свою очередь, рассчитывать возможные потери при сильных землетрясениях [Заалишвили и др., 2014] и разрабатывать специальные подходы по их снижению и даже защите [Заалишвили, Кранцфельд, 2014]. В целом землетрясения, как и другие опасные процессы, особенности которых ограничивалось описательными средствами, изучаются современными инструментальными средствами [Заалишвили, Харебов, 2008].

В этой связи современная застройка урбанизированной территории в условиях высокой или умеренной сейсмической опасности может и должна формироваться

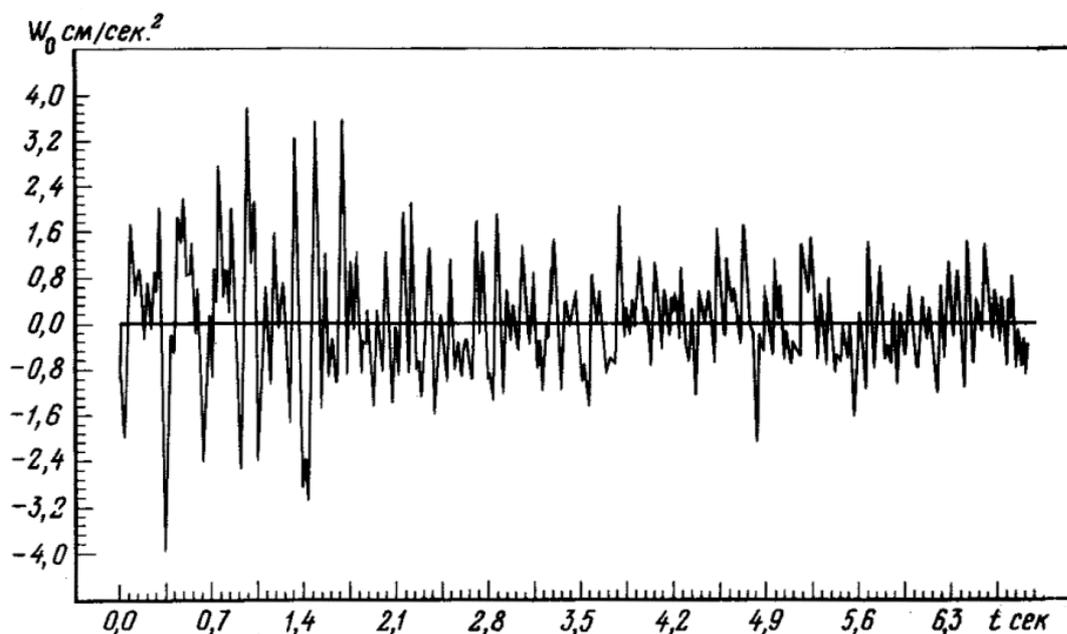


Рис. 4. Акселерограмма Дманисского землетрясения 1978 г., записанная в г.Тбилиси

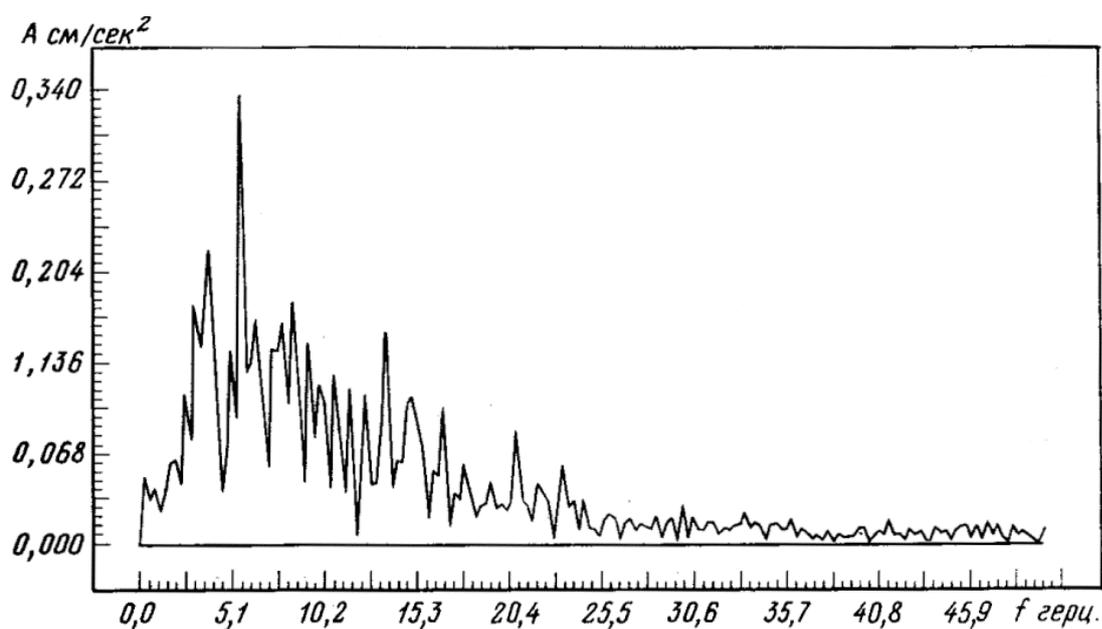


Рис. 5. Спектр акселерограммы Дманисского землетрясения 1978 г.

на основе учета собственных инструментальных записей землетрясений.

В это связи необходимо отметить получение В. Б. Заалишвили первой на Кавказе акселерограммы Дманисского землетрясения (Грузия, 2 января 1978 г.), записанной в г. Тбилиси на скальном грунте (рис. 4 и 5) [Самков и др., 1982]. Это стало основой создания расчетных моделей колебаний грунтов, находящихся в тесной органической связи с рассматриваемой территорией, традиционного использования записей землетрясений, происшедших в других удаленных регионах.

Позже, уже после разрушительного Рачинского землетрясения (Грузия, 29.04.1991) Грузия, 14.12.2000 с помощью более современных трехкомпонентных цифровых преобразователей Швейцарской системы SMACН Институтом геофизики АН ГССР были получены записи Губанского (Грузия, 14.12.2000) и Тбилисских – форшока (Грузия, 11.04.2002) и основного толчка (Грузия, 25.04.2002) – разрушительных землетрясений.

В работах С. Б. Смирнова отмечается, что при разрушительных землетрясениях в спектре землетрясения должны быть весьма малой продолжительности высокочастотные составляющие, которые обуславливают срез ж/б колонн и разрушение жестких кирпичных зданий [Смирнов и др., 2013].

Анализ записей показывает, что на записях вертикальных компонент Губанского и Тбилисских землетрясений отчетливо выделяется вертикальный высокочастотный импульс (рис. 4–11). Именно нахождение урбанизированной территории в ближней зоне источника обуславливает наличие высокочастотной вертикальной составляющей, предваряющей основные колебания. Хорошо известно, что поглощение сейсмических волн прямо пропорционально частоте колебаний, что предполагает быстрое затухание высокочастотной составляющей сигнала. При этом, за

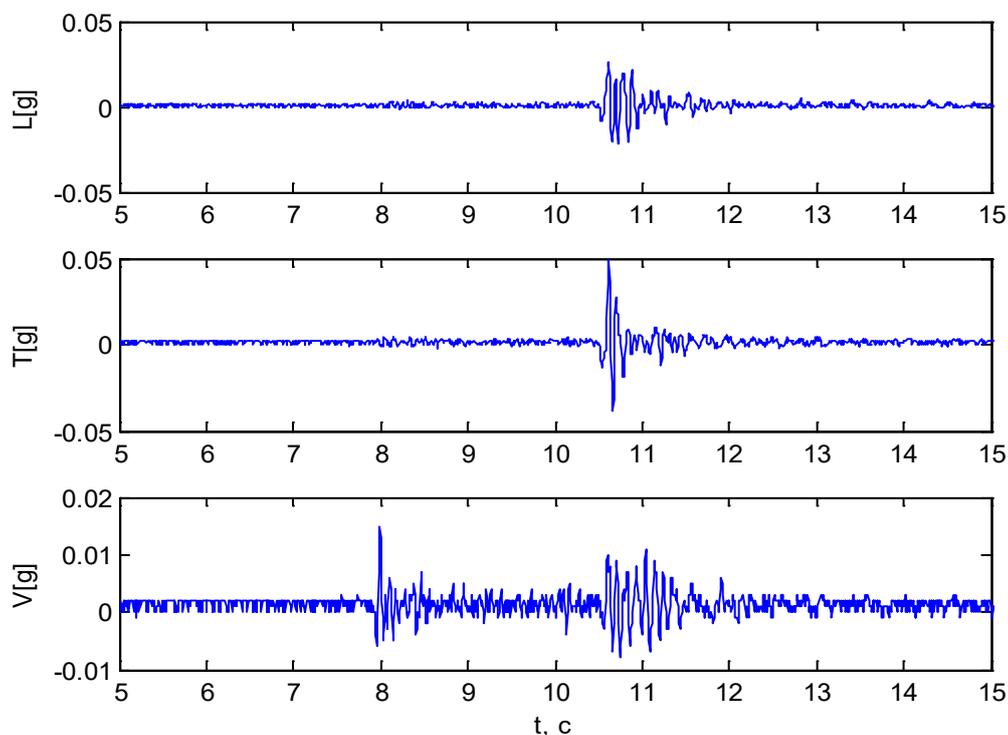


Рис. 6. Акселерограмма Губанского землетрясения от 14 декабря 2000 г.

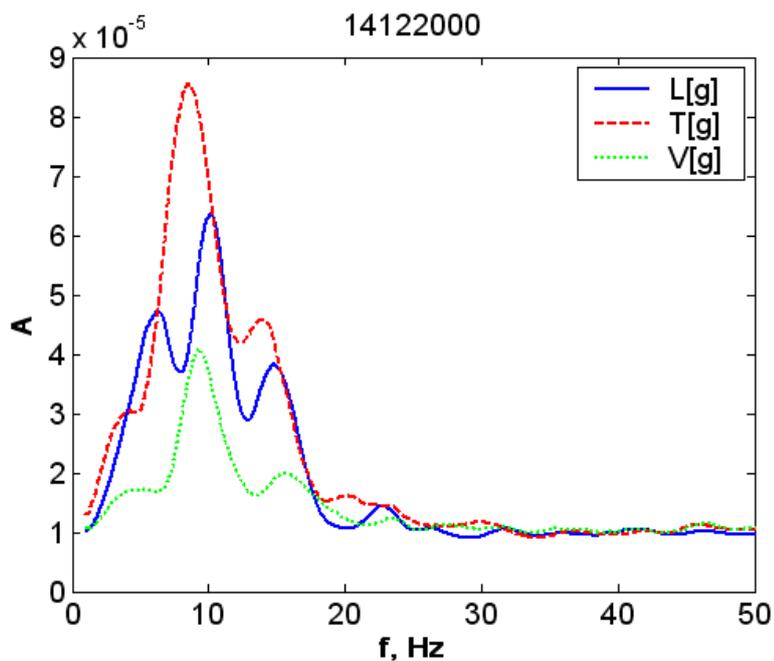


Рис. 7. Спектр акселерограммы Губанского землетрясения от 14 декабря 2000 г.

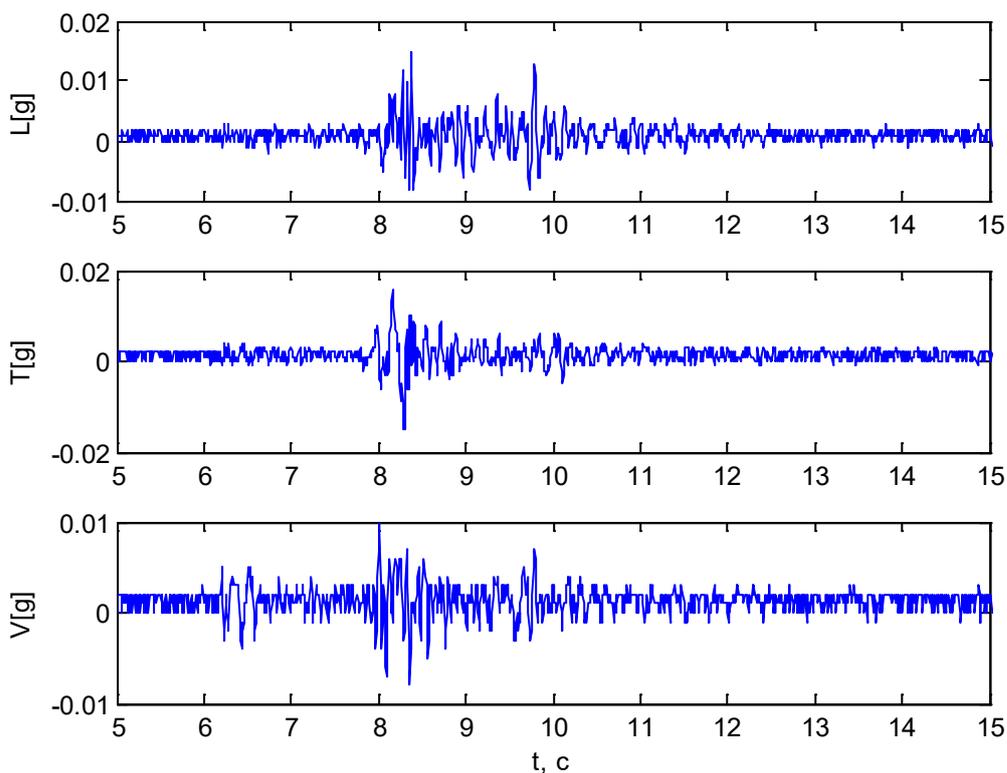


Рис. 8. Акселерограмма Тбилисского землетрясения от 11 апреля 2002 г.

редким исключением, большинство записей производится станциями, достаточно удаленными от места событий. Традиционное использование инерционных сейсмоприемников, при этом, исключает регистрацию указанных высокочастотных сигналов. Указанный вопрос требует специального исследования.

Анализ спектров также показывает, что область максимумов сейсмического воздействия Тбилисских землетрясений приходится на 3–5 Гц, в то время как область максимумов Гоубанского землетрясения – на 9–10 Гц.

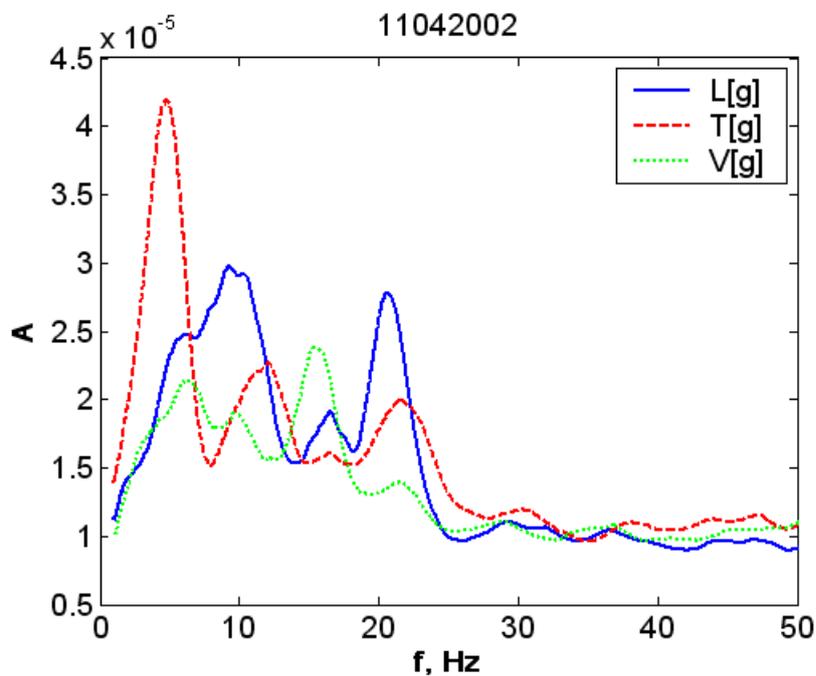


Рис. 9. Спектр акселерограммы Тбилисского землетрясения от 11 апреля 2002 г.

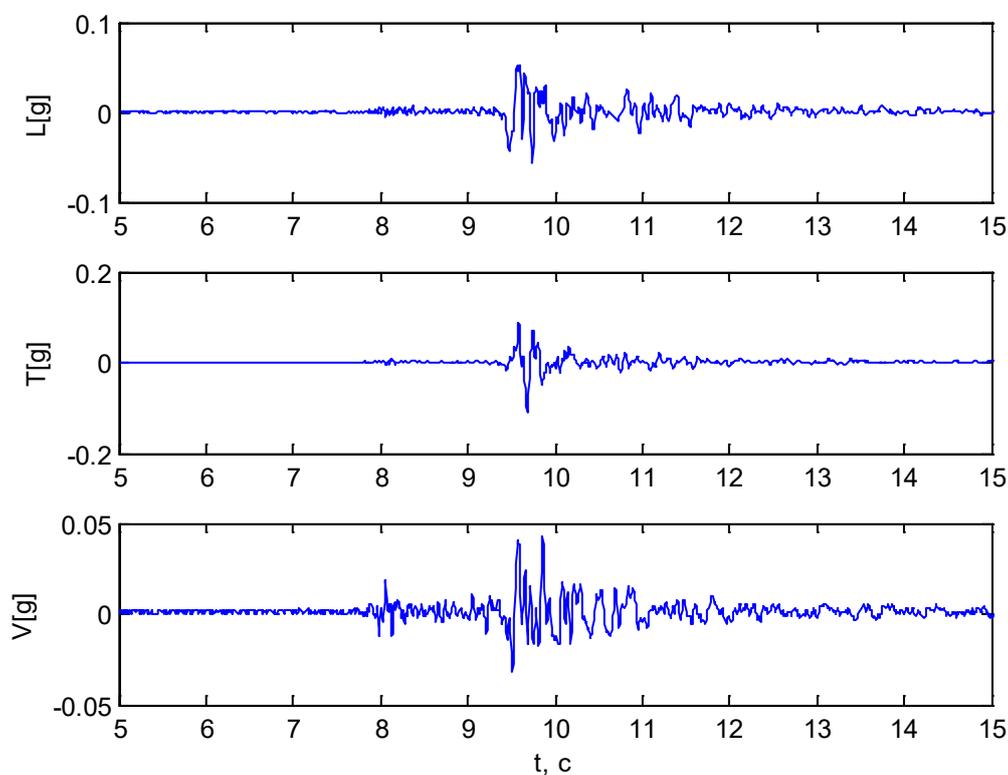


Рис. 10. Акселерограмма Тбилисского землетрясения от 25 апреля 2002 г.

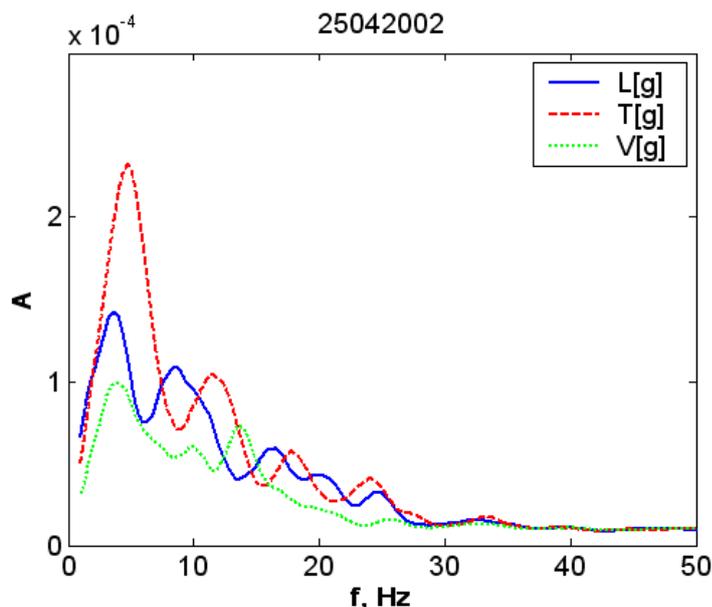


Рис. 11. Спектр акселерограммы Тбилисского землетрясения от 25 апреля 2002 г.

Исходя из того обстоятельства, что очаги Тбилисских землетрясений были расположены непосредственно под территорией г. Тбилиси, использование соответствующих записей должно позволить получать реакции зданий и сооружений на подобные воздействия максимально приближенными к реальным условиям.

Одной из проблем проектирования и практического строительства является изменение традиционного подхода, а именно формирование застройки, в отличие от недавнего прошлого, современной урбанизированной территории зданиями или сооружениями пространственно открытыми и удовлетворяющими жизненным потребностям.

С целью иллюстрации эффективности применения в жилых крупнопанельных зданиях конструктивной схемы с супершироким шагом была исследована надежность 5-этажного крупнопанельного здания индивидуальной серии [Реквава, 2006] при увеличении шага между несущими стенами до 8,4 м.

Динамический расчет был проведен методом конечных элементов по программе «BUILDING-NL» на основе комплексной расчетной модели с учетом нелинейной податливости узлов соединения конструктивных элементов, локальной нелинейности поверхности раздела между зданием и основанием и начальных условий (влияния статической нагрузки от собственного веса конструкции на напряженно-деформированное состояние (НДС) системы) при смешанной системе шагов несущих стен: в первом варианте – 4,2 и 7,2 м (3,2+4,0), а во втором – 4,2 и 8,4 м (4,2+4,2). Следует отметить, что рост шага до 8,4 м осуществлен за счет увеличения ширины стеновых панелей и плит перекрытий одного и того же типа, на 1,0 и 0,2 м между осями (2–3), (3–4) и (5–6), (6–7) (рис. 12).

Вес типового этажа в легкобетонном варианте при ширине шага стен 7,2 м составляет 2951,4 кН, а при шаге 8,4 м – 3240 кН.

Грунтовый массив представлен в виде не инерционной прямоугольной призмы размером в плане 280×170 м. Участок грунта от поверхности до коренных пород состоит из двух слоев ( $H_1=10$  и  $H_2=50$  м) в виде упруго деформированных 1426 трехмерных конечных элементов в каждом узле с тремя поступательными степенями свободы.

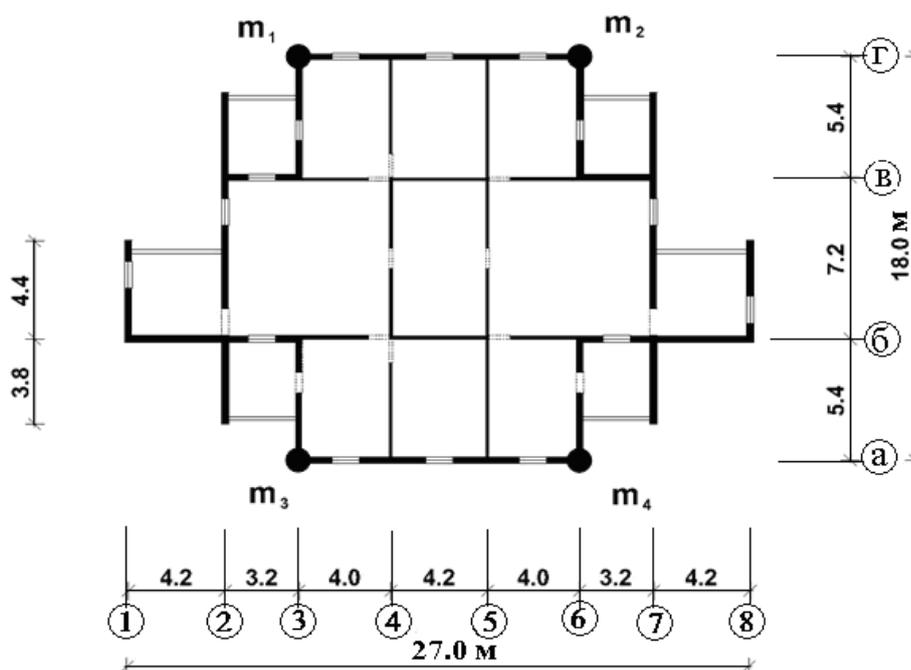


Рис. 12. Схематический план здания

Воздействия при расчете были смоделированы нормированной на 8 баллов трехкомпонентной акселерограммой землетрясения в Тбилиси от 25 апреля 2002 г. и трехкомпонентными синтетическими акселерограммами, сгенерированными по данным для зон ВОЗ 12, 16, 7 и 11 района г. Тбилиси, продолжительностью соответственно 2,51, 2,99, 4,12 и 6,28 с. Пересчет акселерограмм на скалу реализован по методике, разработанной в ИСМиС им. К.С. Завриева. Пиковые горизонтальные ускорения пересчитанных синтетических акселерограмм по зонам составили 1,18, 1,09, 0,94 и 2,69 м/с<sup>2</sup> соответственно.

Сравнение расчетных начальных периодов собственных колебаний системы показало, что увеличение шага до 8,4 м обуславливало изменение периода основного тона на 5%, тогда как разница в значениях периодов более высокого тона составляет 30–91%. В то же время в результате учета конечной жесткости узлов соединения конструктивных элементов для шага 7,2 м период основного тона здания на 20% больше, чем системы «здание-грунтовый массив» с идеальным сцеплением на контактной поверхности.

Согласно результатам анализа максимальные полные перемещения на уровне покрытия в обоих вариантах практически совпадают, кроме воздействия акселерограммы, сгенерированной для 11-й зоны, доминантный период которой близок к периоду основного тона собственного колебания здания. В этом случае разница в вертикальных перемещениях составляет 13%, а горизонтальные перемещения в обоих направлениях приблизительно в 1,6 раза больше при реализации шага 8,4 м.

Несмотря на некоторое уменьшение общей жесткости системы, при ее колебаниях в упругопластической стадии горизонтальные максимальные относительные перемещения в первом варианте колеблются в пределах 0,00028–0,0008 в продольном направлении, а в поперечном – 0,0002–0,00068 и также меньше 1/1200. Во втором варианте они достигают максимума 0,0014 и 0,00106 соответственно в продольном и поперечном направлениях при воздействии землетрясения от 11-й зоны, что на 40 и 22% больше предельно допустимого значения. При воздействии осталь-

ных землетрясений значения указанных относительных перемещений находятся в пределах  $1/5880$ – $1/2222$ , что значительно меньше предельно допустимых.

Расчетом установлено, что при шаге 7,2 м максимальные горизонтальные перемещения при действии тбилисской акселерограммы при упругопластических колебаниях системы «здание – контактные элементы – грунтовый массив» в 3,9 раза больше перемещений, определенных по комплексной расчетной модели в случае идеального сцепления на поверхности раздела здания и основания при упругих колебаниях.

В процессе упругопластических колебаний происходит рост перекосов этажей по абсолютной величине. В то же время из-за развития нелинейных деформаций имеет место их перераспределение по сравнению с упругими колебаниями, перекосы увеличиваются на верхних и уменьшаются на нижних этажах. Можно заключить, что перекосы верхних этажей при упругопластических колебаниях более чувствительны к изменению параметров внешнего воздействия, чем при упругих колебаниях.

Относительные перекосы этажей в первом варианте в продольном и поперечном направлениях здания колеблются соответственно в пределах  $0,00025$ – $0,00083$  и  $0,00019$ – $0,00073$ , что значительно меньше предельного перекоса для нелинейной системы –  $1/200$ . Во втором варианте этажные относительные перекосы достигают максимума при воздействии землетрясения от 11-й зоны и в продольном направлении составляют  $0,0016$ , а в поперечном –  $0,0014$ , что приблизительно в 3 раза меньше предельно допустимого значения. При воздействии остальных акселерограмм относительные перекосы в продольном направлении здания не превышают  $0,00036$ , а в поперечном –  $0,0008$ , что указывает на способность рассматриваемой конструктивной системы с супершироким шагом сопротивляться землетрясениям высокой интенсивности различного спектрального состава.

При упругопластических колебаниях максимальное горизонтальное ускорение поверхности грунта непосредственно под зданием во время Тбилисского землетрясения составляло  $2,1 \text{ м/с}^2$  в обоих вариантах, что почти соответствовало ускорению при том же воздействии в процессе упругих колебаний. При действии остальных акселерограмм оно колеблется в пределах  $1,05$ – $1,98 \text{ м/с}^2$  в первом варианте и  $0,89$ – $2,42 \text{ м/с}^2$  – во втором. При этом максимальное значение имеет место в случае воздействия акселерограммы от 11-й зоны.

Установлено, что во втором варианте максимальное горизонтальное ускорение на уровне верха здания увеличивается на 35% при Тбилисском землетрясении, а при воздействии акселерограммы от 11-й зоны в 1,28 раза больше по сравнению с первым вариантом (табл. 1). При Тбилисском землетрясении во время упругопластических колебаний горизонтальные и вертикальные компоненты ускорений на 11% меньше, чем упругой системы.

На поверхности раздела между зданием и основанием максимальный относительный сдвиг (проскальзывание) имеет место в поперечном направлении здания при первом варианте, а при втором – в продольном направлении. Величина проскальзывания во втором варианте достигает максимума при воздействии акселерограммы от 11-й зоны –  $0,0006 \text{ м}$ , что в 2,8 раза больше, чем при Тбилисском землетрясении. В остальных случаях проскальзывание значительно меньше в продольном направлении и колеблется в пределах  $0,00007$ – $0,0001 \text{ м}$ , а в поперечном – от  $0,000036$  до  $0,000066 \text{ м}$ . При упругопластических колебаниях во время Тбилисского землетрясения в первом варианте максимальная величина проскальзывания составляла  $0,00006 \text{ м}$ , что на 40% меньше, чем при упругих колебаниях.

В рассматриваемых землетрясениях раскрытие узлов, находящихся в плоскости взаимодействия, не имеет места. Осадка здания, обусловленная конструктивной нелинейностью, имеет также неравномерный характер в обоих вариантах и одного

порядка. При воздействии акселерограммы от 11-й зоны осадка максимальная – 0,013 м, что в 1,2 раза больше, чем при Тбилисском землетрясении и в 1,4–1,6 раза превышает таковую при воздействии остальных акселерограмм, хотя меньше предельно допустимой, которая для крупнопанельного здания равна 0,1 м.

Максимальная сжимающая сила в указанной плоскости в обоих вариантах развивается при землетрясении от 11-й зоны и составляет 158 и 167 кН, что на 18% больше, чем при Тбилисском землетрясении. Характер изменения сдвигающих сил во времени при различных землетрясениях аналогичен нормальным силам. Их значения достигают максимума при землетрясении от 11-й зоны и для первого и второго вариантов соответственно составляют 273 и 291 кН, что в 2,2–2,6 раза превышает сдвигающую силу, возникшую при Тбилисском землетрясении 25 апреля 2002 г.

Таблица 1

### Максимальные ускорения на уровне верха здания, м/с<sup>2</sup>

Акселерограмма землетрясения	Вариант расчета			
	первый		второй	
	горизонтальное	вертикальное	горизонтальное	вертикальное
Тбилиси	1,37	3,16	2,1	4,03
в зоне:				
12-й	1,74	1,65	1,39	2,03
16-й	1,17	1,58	1,29	1,92
7-й	1,37	1,25	1,22	1,67
11-й	3,64	4,53	4,64	5,8

При упругопластических колебаниях рассматриваемой системы при шаге 7,2 м нормальные и сдвигающие силы при Тбилисском землетрясении соответственно на 11 и 24% больше, чем полученные в случае упругих колебаний.

Установлено, что рост деформаций вследствие учета нелинейной податливости узлов соединения конструктивных элементов обуславливает увеличение усилий, действующих на панели наружных стен нижних этажей, уменьшение во внутренних продольных стенах и возникновение растянутых зон в перемычках панелей с проемами в отдельных стенах.

Максимальное сжимающее напряжение в наиболее нагруженных панелях наружных стен первого этажа при Тбилисском землетрясении составляет 0,71 МПа, что на 24% больше такового, определенного без учета нелинейной податливости, но на 70% меньше расчетного сопротивления на сжатие бетона класса В5. Максимальные сжимающие напряжения при воздействии синтетических акселерограмм колеблются в пределах 0,62–0,89 МПа, достигают максимума при воздействии акселерограммы от 11-й зоны, но оказываются также меньше расчетного сопротивления бетона. Максимальное растягивающее напряжение в этих же панелях достигает 0,96 МПа при воздействии акселерограммы от 11-й зоны. Это означает, что в этих панелях возникают трещины, тогда как при Тбилисском и остальных землетрясениях растягивающие напряжения меньше расчетного сопротивления бетона на растяжение.

Во втором варианте в панелях вышеуказанных стен максимальные сжимающие напряжения растут при всех землетрясениях на 19–25%, хотя также меньше расчетного сопротивления бетона. Максимальные растягивающие напряжения в этих

панелях возникают только при землетрясении от 11-й зоны и на 13% больше, чем в первом варианте. В других случаях максимальные растягивающие напряжения колеблются в пределах 0,23–0,34 МПа, что не влияет на работу конструкции.

Во внутренних продольных стенах в первом варианте максимальные сжимающие и растягивающие напряжения значительно меньше соответствующих расчетных сопротивлений бетона. Во втором варианте только при воздействии акселерограммы от 11-й зоны в наиболее напряженной панели максимальное растягивающее напряжение достигает 0,53 МПа и увеличивается примерно на 60% по сравнению с первым вариантом, однако меньше расчетного сопротивления на растяжение бетона класса В 12,5. Что касается максимальных сжимающих напряжений, то во втором варианте их величина повышается на 24–38% при действии рассматриваемых землетрясений и достигает максимума 1,54 МПа также при землетрясении от 11-й зоны, что значительно меньше расчетного сопротивления бетона на сжатие.

При Тбилисском землетрясении в указанных отдельных панелях наблюдается как уменьшение на 2%, так и увеличение на 13% сжимающих напряжений по сравнению с расчетом без учета нелинейной податливости узлов. Что касается растягивающих напряжений, то их значение и уменьшается и увеличивается приблизительно на 70%, но значительно меньше расчетного сопротивления бетона.

В отдельных сплошных панелях первого этажа поперечных стен максимальные сжимающие напряжения в первом и во втором вариантах соответственно составляют 3,15 и 4,67 МПа при землетрясении от 11-й зоны, что значительно меньше расчетного сопротивления бетона класса В 12,5. Если при Тбилисском землетрясении главные растягивающие напряжения меньше расчетного сопротивления бетона в обоих вариантах, то в условиях землетрясения от 11-й зоны в первом варианте они достигают 2,1 МПа, что в 2,1 раза меньше, чем во втором варианте, хотя в несколько раз превышают расчетное сопротивление бетона. При воздействии остальных синтетических акселерограмм в первом варианте главные растягивающие напряжения остаются меньше расчетного сопротивления бетона, а во втором – в 1,04–1,2 раза превышают его.

Следует отметить, что при воздействии Тбилисского землетрясения в указанных панелях при учете нелинейной податливости узлов элементов при шаге 7,2 м максимальные сжимающие напряжения возрастают в 1,2 раза, а максимальные растягивающие увеличиваются на 26%.

В панелях с проемами поперечных стен в центральной части здания в обоих вариантах при всех рассматриваемых землетрясениях максимальные сжимающие напряжения в поле конструкции не превышают расчетное сопротивление бетона. Во втором варианте рост указанных напряжений составляет 10–30%. В перемычках наиболее напряженных прерывчатых стен только в условиях землетрясения от 11-й зоны они превышают расчетное сопротивление бетона. Перемычки этих панелей при воздействии рассматриваемых землетрясений получают повреждения от растягивающих напряжений, максимальное значение которых при Тбилисском землетрясении достигает 8,5 МПа в первом варианте и на 11% меньше по сравнению со вторым вариантом. При воздействии акселерограммы от 11-й зоны максимальное растягивающее напряжение составляет 11,9 МПа в первом варианте и в 1,3 раза больше, чем во втором.

Согласно численным результатам при Тбилисском землетрясении при упруго-пластических колебаниях величина главных сжимающих напряжений в поле панелей первого этажа поперечных стен возрастает всего на 9%, тогда как в опорных сечениях перемычек она достигает 45%. Наблюдается значительное увеличение максимальных растягивающих напряжений только в зонах перемычек, когда в остальных частях конструкций они увеличиваются примерно на 50%.

Увеличение шага до 8,4 м не вызывает повреждения панелей перекрытий с исчерпанием несущей способности сжатых сечений. Максимальные сжимающие напряжения при Тбилисском землетрясении и в условиях акселерограммы от 11-й зоны составляют 4,6 и 7,25 МПа соответственно в наиболее напряженных большепролетных панелях перекрытия первого этажа, что меньше расчетного сопротивления на сжатие бетона класса В15. В остальных случаях их величина колеблется в пределах 3,7–4,15 МПа. Наиболее уязвимыми местами можно считать узлы сопряжения панелей перекрытий, где наблюдаются зоны концентрации главных растягивающих напряжений, достигающих максимума – 7,01 МПа на уровне первого этажа при воздействии акселерограммы от 11-й зоны, которые составляют 4,3 МПа в случае Тбилисского землетрясения, что значительно превышает расчетное сопротивление бетона на растяжение. При воздействии остальных синтетических акселерограмм значение указанных напряжений изменяется от 3,68 до 4,05 МПа. Следовательно, в этих местах возможно возникновение трещин, а также раскрытие швов между панелями, что может привести к локальному повреждению отдельных узлов.

В процессе сейсмического воздействия деформирование узлов соединения конструктивных элементов имеет сложный характер. Количество упругопластических циклов для различных узлов здания в зависимости от продолжительности и спектрального состава реального и сгенерированных землетрясений достигает 10–30. При этом в узлах здания нижних этажей, особенно первого, имеет место только образование трещин при действии как нормальных, так и сдвигающих усилий. Максимальные сжимающие и растягивающие усилия, возникающие при воздействии акселерограммы от 11-й зоны в узле на уровне пола первого этажа наружной стены, равны 203,2 и 73,2 кН соответственно, что составляет 44 и 37% предела прочности узла. Что же касается сдвигающего усилия, то в том же узле оно равно 50,4 кН и в 1,1 раза меньше аналогичного усилия, действующего на узел на том же уровне в прерывчатой стене. При этом максимальное сдвигающее усилие составляет 24% усилия, соответствующего пределу течения арматуры в узле, и 21% предельного сдвигающего усилия, которое вызывает пластическое деформирование.

Во втором варианте расчета концентрация максимальных нормальных и сдвигающих усилий в плане и по высоте здания имеет тот же характер, как и при реализации шага 7,2 м. Максимальные сжимающие и растягивающие усилия, действующие на том же узле наружной стены, равны соответственно 249,4 и 96 кН, что в 1,2–1,3 раза больше, чем в первом варианте, и соответственно составляют 56 и 48% предела прочности узла. Сдвигающее усилие на узел вышеуказанной прерывчатой стены 76,8 кН в 1,3 раза больше, чем в первом варианте, и соответственно составляет 41 и 37% силы, соответствующей пределу течения арматуры, и предельной сдвигающей силы на узел.

Анализ напряженно-деформированного состояния крупнопанельного здания с супершироким шагом показал, что в условиях рассматриваемых землетрясений зафиксировано образование трещин и развитие локальных повреждений в шпоночных узлах, однако система сохраняет статическую неопределимость. Определитель матрицы жесткости расчетной модели не становится равным нулю и не меняет знак, что указывает на то, что не нарушены условия геометрической неизменяемости. При этом остаточные перемещения в узлах здания в горизонтальном направлении не превышают допустимого значения – 0,03 м, а в вертикальном направлении также находятся в допустимых пределах – 0,01 м. В этом случае коэффициент нелинейности системы может быть оценен величиной  $\mu=2$ , а соответствующий нормативный коэффициент  $K_1$ , учитывающий способность конструкции к развитию нелинейных деформаций – 0,5.

Для первого (а) и второго (б) вариантов была получена точечная оценка надеж-

ности крупнопанельного здания при воздействии Тбилисского и сгенерированных акселерограмм.

Анализ показал, что величина надежности, связанная с конкретными свойствами сейсмических воздействий района г. Тбилиси, больше допустимой (0,9) для жилых зданий, что обеспечивает полную безопасность жильцов во время землетрясения.

В качестве основного вывода можно отметить, что несущая способность 5-этажного крупнопанельного здания с супершироким (8,4 м) шагом не превышена, оно сопротивляется воздействию землетрясений интенсивностью 8 баллов и сохраняет способность дальнейшего деформирования. Надежность здания, больше предельно допустимой (0,9) для жилых зданий, обеспечивает сохранность конструкций от разрушения и позволяет рекомендовать целесообразность экспериментального проектирования и строительства предложенного здания с супершироким шагом стен.

### Выводы

Анализ показал, что величина надежности, связанная с конкретными свойствами сейсмических воздействий района г. Тбилиси, больше допустимой (0,9) для жилых зданий, что обеспечивает полную безопасность жильцов во время землетрясения.

Установлено, что несущая способность 5-тиэтажного крупнопанельного здания с супершироким (8,4 м) шагом не превышена, оно сопротивляется воздействию землетрясений интенсивностью 8 баллов и сохраняет способность дальнейшего деформирования. Надежность здания, больше предельно допустимой (0,9) для жилых зданий, обеспечивает сохранность конструкций от разрушения и позволяет рекомендовать целесообразность экспериментального проектирования и строительства предложенного здания с супершироким шагом стен.

### Литература

1. Бондырев И.В., Заалишвили В.Б. Опасность активизации геодинамических процессов на Северном Кавказе // Вестник Владикавказского научного центра. 2003. Т. 3. №2. С. 39–46.
2. Гогмачадзе С.А., Заалишвили В.Б., Одишария А.В., Кипиани Д.Г. Апрельские землетрясения 2002 г. в Тбилиси // Труды II Кавказской международной школы семинара молодых ученых «Сейсмическая опасность и управление сейсмическим риском на Кавказе», Владикавказ, 20–22 сентября, 2007. Владикавказ, 2007, С. 55–88.
3. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование по данным искусственного возбуждения колебаний грунтовой толщи // Автореферат кандидатской диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Институт Геофизики АН ГССР. Тбилиси, 1986.
4. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование на основе изучения нелинейных свойств грунтов искусственными источниками // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Москва, 1996.
5. Заалишвили В.Б. Инструментальный метод сейсмического микрорайонирования // Владикавказ, 1997. 76 с.
6. Заалишвили В.Б., Харебов А.К., Харебов К.С. Комплекс вычислительных программ «ncb-02» для обработки инструментальных записей природных и техногенных катастроф // В сборнике: Информационные технологии и системы: наука и практика Материалы Международной конференции. 2002. С. 399–401.
7. Заалишвили В.Б., Харебов К.С. Исследование процесса схода ледника Колка 20.09.2002 по динамическим характеристикам инструментальных записей // В сб.

«Опасные природные и техногенные геологические процессы на горных и предгорных территориях Северного Кавказа». ЦГИ ВНИЦ РАН и РСО-А, Заалишвили В.Б. (редактор), Владикавказский научный центр РАН и РСО-А. 2008. С. 202–221.

8. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Дзеранов Б.В. Особенности динамического поведения грунтов территории г. Владикавказа // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2008. № 2. С. 67–71.

9. Заалишвили В.Б., Певнев А.К., Рогожин Е.А. О геодезическом мониторинге для прогноза землетрясений на Северном Кавказе (на примере Владикавказского прогнозного полигона) // Геология и геофизика Юга России. 2011. №2. С. 33–40.

10. Заалишвили В.Б., Невская Н.И., Невский Л.Н., Трофименко С.Н., Шемпелев А.Г. Глубинные геофизические исследования в Северокавказском федеральном округе: проблемы глубинной геологии и геофизики в региональных исследованиях. О зоне предполагаемого Ардонского межглыбового разлома // Геология и геофизика Юга России. 2012. №2. С. 11–20.

11. Заалишвили В.Б., Бурдзиева О.Г., Закс Т.В., Кануков А.С. Информационный мониторинг распределённых физических полей в пределах урбанизированной территории // Геология и геофизика Юга России. 2013а. №4. С. 8–16.

12. Заалишвили В.Б., Джгамадзе А.К., Гогичев Р.Р. О создании карт инженерно-геологического районирования населённых пунктов республики Северная Осетия-Алания, как основы сейсмического микрорайонирования // Геология и геофизика Юга России. 2013б. №3. С. 20–28.

13. Заалишвили В.Б., Харебов К.С., Харебов А.К. Создание баз данных сильных движений на основе современных воззрений // Геология и геофизика Юга России. 2013 в. №3. С. 39–44.

14. Заалишвили В.Б., Харебов К.С., Харебов А.К. Статистический анализ параметров базы данных сильных грунтовых движений // Геология и геофизика Юга России. 2013 г. №4. С. 17–22.

15. Заалишвили В.Б. Некоторые проблемы практической реализации сейсмического микрорайонирования. Факторы, формирующие интенсивность землетрясения // Геология и геофизика Юга России. 2014а. №3. С. 3–39.

16. Заалишвили В.Б. Зависимость спектральных характеристик сейсмических волн от строения верхней части разреза // Геология и геофизика Юга России. 2014б. №4. С. 15–44.

17. Заалишвили В.Б. Корреляционные взаимосвязи между линейными и нелинейными характеристиками грунтов по инструментальным данным // Геология и геофизика Юга России. 2014 в. №4. С. 45–57.

18. Заалишвили В.Б., Дзеранов Б.В., Невский Л.Н., Архиреева И.Г. Оценка сейсмического риска урбанизированной территории // Геология и геофизика Юга России. 2014. №2. С. 22–29.

19. Заалишвили В.Б., Кранцфельд Я.Л. Геофизическая основа инженерной сейсмозащиты ответственных объектов строительства // Геология и геофизика Юга России. 2014. №1. С. 39–50.

20. Реквава П.А. Оценка сейсмостойкости крупнопанельного здания с широким шагом стен на основе комплексной расчетной модели // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2006. №1. С. 31–35.

21. Самков Б.Н., Джабаури Г.Г., Датунашвили А.С., Заалишвили В.Б. Акселерограмма Дманисского землетрясения от 2 января 1978 г. записанная в г. Тбилиси на грунте и соответствующие спектры Фурье и реакции // Дманисское землетрясение 2 января 1978 г. М.: Наука, 1982, с. 127–131

22. Смирнов С.Б., Ордобаев Б.С., Айдаралиев Б.Р. Сейсмические разрушения – альтернативный взгляд. Часть 2. Бишкек: 2013. 144 с.

23. Zaalishvili V.B., Rogozhin E. A. Assessment of seismic hazard of territory on basis of modern methods of detailed zoning and seismic microzonation // Open Construction and Building Technology Journal. 2011. T. 5. C. 30–40.

DOI: 10.23671/VNC.2016.2.20815

## **SEISMIC RESISTANCE INVESTIGATION OF A LARGE-PANEL BUILDING WITH SUPER-WIDE WALL SPACING**

**© 2016 P.A. Rekvava, Sc. Doctor (Tech.), prof.**

Georgian National Association for Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Georgia, Tbilisi, M. Lebanidze street, 7,  
e-mail: rekvavapaata@yahoo.com

The problem of earthquake prediction and its effectiveness is discussed. The analysis of the situation with the implementation of the medium-term forecast of devastating earthquake April 25, 2002, Tbilisi, Georgia was held.

Engineering-geological, geomorphological and hydrogeological conditions of Tbilisi are reviewed. 5-point forshock and 7-point main shock isoseists are shown.

This article discusses a number of devastating earthquakes records, which source was close to the urbanized territory. The analysis of instrumental records was held. It is shown that the near-source zone urbanized territory determines the availability of high-frequency vertical component, anticipating major fluctuations. It is well known that absorption of seismic waves is directly proportional to the frequency of the oscillations, which involves rapid attenuation of signal high-frequency component. Thus, with few exceptions, most of the records produced by stations, quite remote from the scene. Traditional use of inertial seismic detectors excludes the registration of these high frequency signals.

Earthquakes are located directly beneath the territory of Tbilisi so the use of appropriate records should enable to receive buildings and structures reactions to such impact closest to real conditions. In this context, we investigated the efficacy of residential design concept with super-wide wall spacing on the example of 5-storeyed large-panel building. Dynamic calculation using finite element was produced.

**Keywords:** seismic impact, absorption, seismic energy, seismic wave, earthquake resistance, super-wide wall spacing, peak horizontal acceleration.